

水力耦合效应下钻孔灌注桩施工控制技术研究

彭永文 胡小鹏 郭 庶

中建五局土木工程有限公司 湖南 长沙 410000

摘要：本文聚焦于水力耦合效应下钻孔灌注桩施工控制技术展开研究。首先阐述了水力耦合效应对地下室抗拔桩抗拔效果的影响，通过研究复杂地质条件物理力学特征，获取相关力学参数，分析不同土体在地下水作用下的性质变化，开展抗拔试验并提出抗拔施工效果控制措施。其次，探讨了地下水丰富时钻孔成孔效果控制，进行不同土层的钻孔试验，分析地下水渗透压力对成孔稳定性的影响，建立成孔质量控制方法。旨在为水力耦合效应下的钻孔灌注桩施工提供科学有效的控制策略，保障工程质量。

关键词：水力耦合效应；钻孔灌注桩；抗拔桩；施工控制技术

1 引言

钻孔灌注桩凭借其承载力高、适应性强等显著优势，在高层建筑、桥梁工程、地下空间开发等各类建筑工程中占据着不可或缺的基础形式地位，是保障建筑物稳定与安全的关键支撑。然而，在实际施工过程中，水力耦合效应犹如一把“双刃剑”，对钻孔灌注桩的施工质量产生着不可忽视的显著影响。水力耦合效应，本质上是地下水与土体、桩体之间复杂且动态的相互作用过程。这种相互作用会引发土体物理力学性质的改变，比如土体的含水量、孔隙水压力等发生变化，进而直接影响到桩体的受力性能和整体施工效果^[1]。具体而言，在地下室抗拔桩施工中，水力耦合效应会削弱抗拔桩与周围土体间的摩擦力和粘聚力，降低抗拔桩的抗拔效果，给建筑物的抗浮稳定性带来隐患；在钻孔成孔环节，当地下水丰富时，易引发孔壁坍塌、泥浆性能劣化等问题，严重影响成孔的稳定性与垂直度。因此，深入且系统地研究水力耦合效应下钻孔灌注桩施工控制技术，对于提高工程质量、保障施工安全、降低工程成本，具有至关重要的现实意义。

2 水力耦合效应下地下室抗拔桩抗拔效果控制

2.1 复杂地质条件物理力学特征研究

2.1.1 现场土体取样与试验

南昌高新区瑶湖花园七期安置房项目，位于南昌市高新区，包含四个地块，针对其复杂地质条件，通过环刀法、灌砂法在现场选取代表性区域对粉质黏土和砂土进行取样，共取粉质黏土样30组、砂土样25组，并在室内进行了含水量、比重、密度及直剪试验等基本物理力学参数测定，结果显示粉质黏土含水量平均25%、比重2.70-2.75、密度1.8-2.0g/cm³、黏聚力c平均20kPa、内摩擦角φ平均25°；砂土含水量平均15%、比重2.65-2.70、密度

1.6-1.8g/cm³、黏聚力c平均5kPa、内摩擦角φ平均35°，这些参数与地勘报告《南昌高新区瑶湖花园七期安置房项目岩土工程勘察报告》中的数据相吻合，例如，地勘报告中粉质黏土1层的压缩模量平均值为6.10MPa，与现场试验测得的密度和直剪试验结果相吻合，为地下室抗拔桩的设计提供了科学依据。

2.1.2 地下水作用下土体性质参数分析

在现场设置地下水位监测井，定期测量地下水位变化，同时在不同深度和位置取样进行力学性能试验。经过一年的监测发现，在地下水每年循环往复作用下，粉质黏土的含水量变化幅度可达10%-15%，砂土的含水量变化幅度为5%-10%。长期荷载作用下，对土体进行三轴压缩试验。当施加100kPa的长期荷载时，粉质黏土的黏聚力c降低了10%，内摩擦角φ降低了5°；砂土的黏聚力c降低了5%，内摩擦角φ降低了3°。这表明地下水的循环作用和长期荷载会显著降低土体的抗剪强度。

2.1.3 土体性质参数对抗拔力影响程度确定

采用有限元软件ABAQUS建立抗拔桩与土体相互作用的数值模型。模型中桩径取0.8m，桩长取15m，土体分为粉质黏土层和砂土层，厚度分别为8m和7m。分别改变土体的黏聚力c和内摩擦角φ的值，进行多组数值模拟计算。模拟结果显示，当粉质黏土的黏聚力c从20kPa降低到18kPa时，抗拔桩的抗拔力降低了8%；当内摩擦角φ从25°降低到23°时，抗拔力降低了6%。对于砂土，当黏聚力c从5kPa降低到4kPa时，抗拔力降低了5%；当内摩擦角φ从35°降低到33°时，抗拔力降低了7%。由此可知，内摩擦角的变化对抗拔力的影响相对较大。

2.2 水力耦合效应下抗拔试验

2.2.1 试验方案设计

选择施工现场的一块区域，布置3根抗拔试验桩，桩

径均为0.7m，桩长均为24m。试验桩采用水下C35混凝土浇筑，钢筋笼主筋采用HRB400级钢筋，直径为16mm，箍筋采用HRB400级钢筋，直径为8mm。根据现场地下水水位变化情况，设置3种试验工况：工况一为地下水位在桩顶以下2m处；工况二为地下水位在桩顶处；工况三为地下水位在桩顶以上1m处。

2.2.2 试验过程与数据采集

在试验过程中，采用油压千斤顶分级加载，每级荷载为100kN，加载至桩体破坏或达到设计最大荷载2400kN。在每级荷载施加后，稳定10分钟，记录桩顶的位移和周围土体的变形情况。同时，在试验桩周围布置孔隙水压力计，监测地下水位的变化。试验数据显示，在工况一下，当荷载加至2400kN时，桩顶位移为15mm；在工况二下，当荷载加至2200kN时，桩顶位移达到15mm；在工况三下，当荷载加至2000kN时，桩顶位移就达到了15mm。这表明地下水位越高，抗拔桩的抗拔承载力越低。

2.2.3 试验结果分析

根据试验数据绘制抗拔桩的荷载-位移曲线，分析不同地下水条件下抗拔桩的抗拔承载力和变形特性。在工况三下，荷载-位移曲线在荷载达到2000kN后出现明显的转折，表明桩体开始进入塑性变形阶段，抗拔承载力急剧下降。而在工况一和工况二下，曲线转折点对应的荷载分别为2400kN和2200kN。对比不同工况下的试验结果，总结出水力耦合效应对抗拔桩抗拔效果的影响规律：地下水位升高会导致土体的有效应力降低，从而减小桩侧摩阻力，降低抗拔桩的抗拔承载力；同时，地下水位的波动会加速土体的软化，增加桩体的变形。

2.3 地下水位常年变化下抗拔桩抗拔施工效果控制措施

2.3.1 桩身设计优化

根据水力耦合效应对抗拔桩抗拔力的影响分析结果，将桩径增大至0.8m，桩长增加至28m。通过数值模拟计算，优化后的抗拔桩在地下水位常年变化情况下的抗拔承载力提高了20%。采用变截面桩设计，在桩身下部8m范围内将桩径扩大至1.0m，形成扩底桩。扩底桩可以增加桩与土体的接触面积，提高桩侧摩阻力^[2]。数值模拟结果显示，扩底桩的抗拔承载力比普通桩提高了30%。

2.3.2 施工工艺改进

在施工过程中，采用井点降水法降低地下水位。在抗拔桩施工区域周围布置10口井点管，井点管间距为1.5m，降水深度可达5m。通过降水，将地下水位降低至桩顶以下3m处，减少地下水对桩体抗拔效果的影响。对

于地下水位较高且难以降低的场地，采用后注浆技术。在桩身混凝土浇筑完成后7天，通过预埋在桩身的注浆管向桩侧土体注入水泥浆，水泥浆的水灰比为0.5-0.6，注浆压力控制在1-2MPa。后注浆可以改善桩侧土体的物理力学性质，提高桩侧摩阻力，经测试，后注浆后抗拔桩的抗拔承载力提高了25%。

2.3.3 质量监测与检测

加强抗拔桩施工过程中的质量监测，采用低应变动力试桩法对桩身完整性进行检测。在每根桩施工完成后，立即进行低应变检测，检测结果显示桩身完整性系数均大于0.9，表明桩身质量良好。在工程使用过程中，每半年对抗拔桩进行一次监测，采用全站仪测量桩顶的位移，监测结果显示桩顶位移均在设计允许范围内，确保了抗拔桩的长期使用性能。

3 地下水丰富时钻孔成孔效果控制

3.1 不同土层钻孔试验

3.1.1 试验场地与设备选择

选择地下水水位较高的施工场地，该场地地层从上至下依次为粉质黏土层（厚度6m）、砂土层（厚度5m）、砾石层（厚度4m）^[3]。选用反循环钻机进行钻孔试验，钻头采用锥形三翼钻头。

3.1.2 土体剪切力及黏聚力值获取

在钻孔过程中，对不同土层进行取样，每层取样5组。采用直剪试验测定土体的剪切力和黏聚力值，粉质黏土的黏聚力c平均值为18kPa，内摩擦角φ平均值为23°；砂土的黏聚力c平均值为4kPa，内摩擦角φ平均值为33°；砾石层的内摩擦角φ平均值为40°，由于砾石层的黏聚力较小，可忽略不计。

3.1.3 地下水渗透压力对成孔稳定性影响分析

通过现场监测和理论分析，研究地下水渗透压力对不同土层成孔稳定性的影响。在粉质黏土层中，当地下水渗透压力达到20kPa时，土体开始出现软化现象，孔壁出现轻微的坍塌；在砂土层中，当地下水渗透压力达到15kPa时，引发流砂现象，砂土颗粒随地下水流动，导致孔壁不稳定；在砾石层中，当地下水渗透压力达到30kPa时，砾石颗粒移动，孔壁出现局部塌落。

3.2 高地下水位下复杂地层桩基施工成孔质量控制方法

3.2.1 护壁措施选择

对于粉质黏土层，采用泥浆护壁。泥浆的比重控制在1.1-1.2之间，黏度控制在18-22s之间，含砂量控制在4%以内。通过调整泥浆参数，形成稳定的泥浆护壁，防止孔壁坍塌。在钻孔过程中，定期检测泥浆的性能指

标，确保泥浆质量符合要求。对于砂土层和砾石层，采用套管护壁。在钻孔前先下入钢套管，套管直径比桩径大100mm，套管长度根据地层情况确定，一般每节长度为2-3m。在下套管过程中，采用振动锤将套管压入土中，确保套管与孔壁之间紧密贴合，防止地下水渗入孔内。

3.2.2 钻孔参数优化

在粉质黏土层中，将钻进速度控制在0.5-1m/min之间，转速控制在10-15r/min之间，减小钻头对孔壁的扰动。在砂土层中，提高泥浆的比重至1.2-1.3，黏度至22-25s，增加泥浆的护壁效果，同时将钻进速度控制在0.3-0.5m/min之间，转速控制在8-12r/min之间^[4]。在砾石层中，采用冲击钻进方式，控制冲击能量为500-800J，冲击频率为15-20次/min，避免孔壁破坏。

3.2.3 成孔质量检测与处理

在钻孔完成后，采用超声波测井仪和井径仪对成孔质量进行检测。超声波测井仪可以检测孔壁的完整性，井径仪可以测量孔径的大小。检测结果显示，孔径偏差控制在设计桩径的±5%以内，垂直度偏差控制在1%以内。对于不符合设计要求的孔，及时采取处理措施。对于孔径偏小的孔，采用扩孔钻头进行扩孔；对于垂直度偏差较大的孔，采用纠偏装置进行纠偏。经处理后，成孔质量均满足桩基施工要求。

4 结论与展望

4.1 研究成果总结

通过开展复杂地质条件物理力学特征研究，获取了抗拔桩在现场粉质黏土、砂土中的力学参数，分析了不同土体在地下水作用下的性质参数变化，确定了土体性质参数对抗拔力的影响程度，为抗拔桩设计和施工提供了理论依据。进行了水力耦合效应下抗拔试验，总结了水力耦合效应对抗拔桩抗拔效果的影响规律，提出了地下水位常年变化下抗拔桩抗拔施工效果控制措施，包

括桩身设计优化、施工工艺改进和质量监测与检测等方面，有效提高了抗拔桩的抗拔性能和施工质量。对地下水丰富时不同土层进行了钻孔试验，分析了地下水渗透压力对成孔稳定性的影响，建立了高地下水位下复杂地层桩基施工成孔质量控制方法，包括护壁措施选择、钻孔参数优化和成孔质量检测与处理等，保障了钻孔成孔的质量和安全性。

4.2 研究不足与展望

本文的研究主要基于现场试验和数值模拟，由于实际工程地质条件的复杂性和不确定性，部分研究结果可能存在一定的局限性。未来的研究可以结合更多的实际工程案例，进一步验证和完善研究成果。水力耦合效应是一个复杂的过程，涉及地下水、土体和桩体之间的相互作用。目前的研究主要侧重于宏观层面的分析，对于微观层面的作用机制研究还不够深入。未来的研究可以加强微观层面的研究，揭示水力耦合效应的本质和规律。随着建筑技术的不断发展，新型桩基施工技术和材料不断涌现。未来的研究可以关注这些新技术和新材料在水力耦合效应下的应用，探索更加高效、环保、经济的桩基施工控制技术。

参考文献

- [1]梁洋.钻孔灌注桩在复杂地质条件下的桥梁桩基施工应用分析[J].中国水泥,2025,(06):113-115.
- [2]毛宗原,韩凯,方坤,等.粘结型复合大直径抗拔桩界面力学特性模拟研究[J].建筑结构,2025,55(07):143-150+104.
- [3]苏威.高层建筑抗拔桩设计优化研究[J].建筑施工,2024,46(12):2105-2109.
- [4]林茂.孔壁裂隙有压地下水钻孔灌注桩施工工法研究[J].福建建材,2021,(06):46-48.